

УДК 629.12.001

М.Э. Францев

## ПРОЕКТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ АМФИБИЙНОГО СУДНА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ В ЕГО КОНСТРУКЦИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

АО «Нептун-Судомонтаж», г. Москва

Изложены принципы повышения полезной нагрузки амфибийного судна на воздушной подушке, реализуемые на этапе проектирования, за счет использования в его конструкции крупных элементов из композиционных материалов. Приведены проектировочные уравнения, в первую очередь, уравнение нагрузки и уравнение прочности.

*Ключевые слова:* амфибийные суда на воздушной подушке, полезная нагрузка, композиционные материалы.

Известно, что наибольшую долю в совокупной структуре прямых расходов на эксплуатацию скоростного судна и, в частности, амфибийных катеров на воздушной подушке (далее АКВП), составляют расходы на топливо. Поэтому при обосновании основных принципиальных решений в проекте АКВП целесообразно анализировать их интегрированные расходные характеристики, включающие полную массу судна, его скорость, мощность главных двигателей, их удельный расход топлива, а также характеристики полезной нагрузки судна – дедвейт и его отдельные статьи. Наибольший интерес среди таких интегрированных характеристик представляют:

1. Коэффициент утилизации по дедвейту (полезной нагрузке) в виде:

$$\eta = \frac{DW}{D} . \quad (1)$$

2. Расход топлива на перемещение 1 т дедвейта на 1 км пути в виде:

$$P_{DW} = \frac{qN}{D\eta v} . \quad (2)$$

3. Расход топлива на перемещение одного пассажира на 1 км пути в виде:

$$P_{ПАСС} = \frac{qN}{nv} , \quad (3)$$

где  $D$  - полная масса;  $N$  - мощность главных двигателей;  $DW$  – дедвейт (полезная нагрузка);  $q$  - удельный расход топлива двигателей на номинальном режиме;  $v$  - скорость крейсерского хода;  $n$  – пассажироместность [2].

Рассмотрим принципы повышения характеристик эффективности АСВП, реализуемых на этапе проектирования, за счет повышения его полезной нагрузки. Представим нагрузку масс амфибийного судна на воздушной подушке в виде:

$$D = \sum_{i=1}^n P_i , \quad (4)$$

где  $P_i$  – статья нагрузки.

Нагрузка масс также может быть представлена в виде

$$D = \sum_{i=1}^n P_i = D_{пор} + DW , \quad (5)$$

где  $D_{пор}$  – водоизмещение порожнем.

Основными составляющими водоизмещения порожнем для амфибийных судов на воздушной подушке будут:

$$D_{\text{пор}} = P_{\text{корп}} + P_{\text{эу}} + P_{\text{ГО}} + P_{\text{ДК}} + P_{\text{НК}} + P_{\text{эл.об}} + \sum_j P_j, \quad (6)$$

где  $P_{\text{корп}}$  - масса корпуса;  $P_{\text{эу}}$  - масса энергетической установки;  $P_{\text{ГО}}$  - масса гибкого ограждения;  $P_{\text{ДК}}$  - масса движительного комплекса;  $P_{\text{НК}}$  - масса нагнетательного комплекса;  $P_{\text{эл.об}}$  - масса электрооборудования;  $\sum P_j$  - сумма масс всех остальных статей водоизмещения порожнем, как правило, не превышающая 3-5% от общей суммы.

Составляющими дедвейта для амфибийных судов на воздушной подушке будет масса экипажа и пассажиров, а также запас топлива, который в большой степени определяет потребительские качества судна такого типа. Тогда:

$$DW = P_{\text{пасс}} + P_{\text{топл}} + \sum_g P_g, \quad (7)$$

где  $P_{\text{пасс}}$  - масса пассажиров и экипажа;  $P_{\text{топл}}$  - масса топлива;  $\sum P_g$  - масса остальных статей дедвейта, как правило, не превышающая 3-5% от общей суммы.

Проанализировав основные статьи нагрузки масс, можно увидеть, что основным резервом увеличения полезной нагрузки АСВП является правильное проектирование его корпуса, заключающееся в оптимальном сочетании массы корпуса, его общей и местной прочности.

Подсистема «Корпус» является доминирующей среди подсистем первого уровня декомпозиции судна, как системы. Масса корпуса, в состав которой входят массы собственно корпуса АСВП и его надстройки (рубки), входит в качестве слагаемого в уравнение нагрузки и может быть выражена как

$$D = \sum P_i = P_k + \sum P_{i-1} = q_k(LBH) + \sum P_{i-1}, \quad (8)$$

где  $P_k$  - масса по статье нагрузки «Корпус»;  $\sum P_{i-1}$  - масса по статьям нагрузки без статьи «Корпус»;  $L, B, H$  - длина, ширина, высота корпуса;  $q_k$  - кубический модуль, представляющий собой отношение массы корпуса к его объему, определяемый с помощью анализа баз данных.

Материал корпуса является подсистемой второго уровня декомпозиции по отношению к подсистеме «Корпус». Характеристики материала корпуса входит в качестве множителя в уравнение прочности:

$$M_{\text{max}} = k\sigma_0 W, \quad (9)$$

где  $M_{\text{max}}$  - предельный изгибающий момент от общего изгиба АСВП при наиболее неблагоприятном случае эксплуатационной нагрузки;  $\sigma_0$  - предел прочности материала;  $k$  - коэффициент пропорциональности;  $W$  - момент сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса на миделе судна.

Предельный изгибающий момент при общем изгибе АСВП в наиболее неблагоприятном случае эксплуатационной нагрузки, также может быть выражен как

$$M_{\text{max}} = \frac{DL}{k_1}, \quad (10)$$

где  $D$  - полная масса судна;  $k_1$  - коэффициент пропорциональности.

Момент сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса на миделе может быть представлен как

$$W = \frac{\eta_k FH}{2}, \quad (11)$$

где  $F$  - площадь поперечного сечения эквивалентного бруса на миделе;  $\eta_k$  - коэффициент утилизации профиля эквивалентного бруса.

Приравнивая выражения (9) и (10), получим

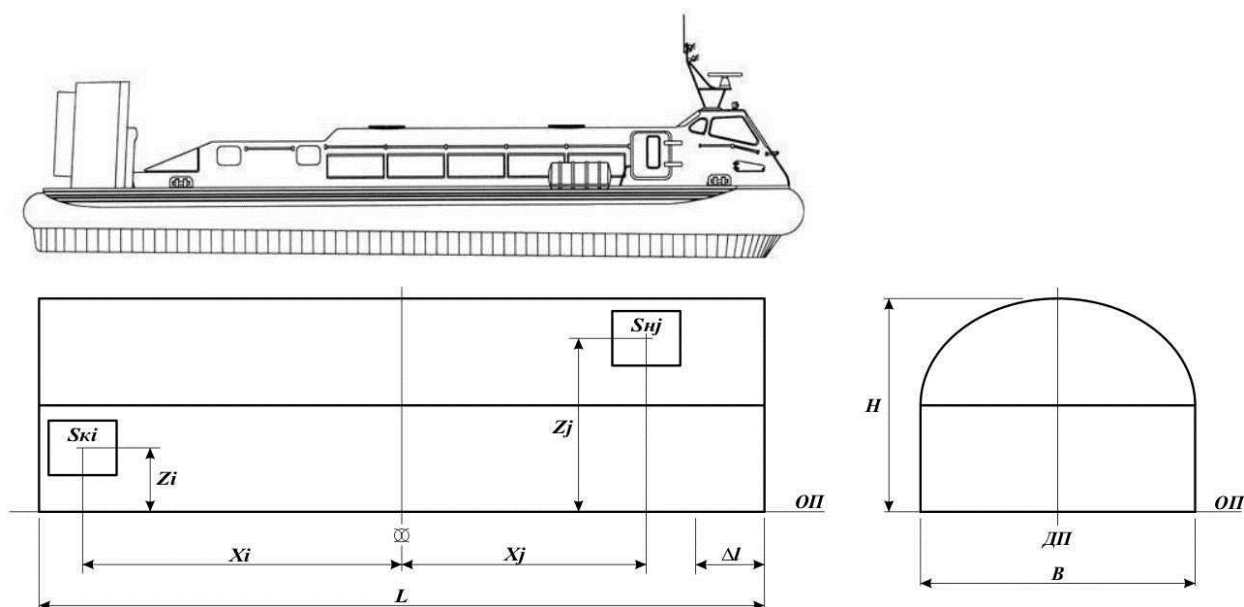
$$\frac{DL}{k_1} = \frac{k\sigma_0\eta_k FH}{2}. \quad (12)$$

Выражение (12) отражает степень влияния материала корпусных конструкций судна на его полную массу и, как следствие, на характеристики полезной нагрузки.

Известно, что характеристики сопротивления АСВП включают составляющие, связанные с движением по водной поверхности или твердому экрану, а также составляющие, связанные с его воздушным сопротивлением. Составляющие сопротивления, связанные с движением по водной поверхности или твердому экрану, обусловлены, в большой степени, конструкцией и формой гибкого ограждения (ГО) воздушной подушки. Составляющие сопротивления АСВП, связанные с его воздушным сопротивлением, в большой степени обусловлены формой его надстройки (рубки) [1].

В соответствии со сложившейся в отечественном судостроении практикой, наиболее предпочтительным материалом для постройки скоростных судов считаются легкие сплавы. В то же время придание конструкциям из легких сплавов совершенных аэродинамических форм связано с применением достаточно сложных технологий обработки и, как следствие, с большими затратами. Поэтому наиболее предпочтительным для подсистемы «Корпус» АСВП является сочетание легких сплавов для конструкции собственно корпуса и композиционных материалов для конструкции надстройки (рубки).

Известно, что наибольшую часть массы корпуса АСВП составляет масса наружной обшивки, а на долю набора, фундаментов и подкреплений редко приходится более 15% массы корпуса [1]. Поэтому на этапе декомпозиции подсистемы «Корпус», на котором производится определение его массы, конструкция корпуса и надстройки (рубки) может рассматриваться, как оболочка.



**Рис. 1. Расчетная схема для определения массы корпуса АСВП, сочетающего в конструкции легкие сплавы и композиционные материалы**

Можно рассматривать поверхность корпуса и надстройки АСВП в виде двух участков. Первым участком является часть корпуса упрощенной формы, находящаяся внутри ГО. Она, как правило, изготавливается из легких сплавов. Вторым участком является поверхность надстройки (рубки) судна, которую целесообразно изготавливать из композиционных материалов. Обе части входят в состав эквивалентного бруса и обеспечивают общую прочность АСВП. Из условия обеспечения прочности корпуса АСВП при общем изгибе (12) может быть выражен предел прочности материала корпуса:

$$\sigma_0 = \frac{2DL}{kk_1\eta_k FH} \cdot \quad (13)$$

Момент сопротивления эквивалентного бруса без учета площади продольного набора, которая, как правило, невелика, на этом этапе разработки проекта может быть представлен как

$$W = \eta_k (B + H) t_{cp} H, \quad (14)$$

где  $t_{cp}$  – средняя толщина обшивки.

Условие обеспечения общей прочности (9) справедливо, как для корпуса, изготовленного из легких сплавов, так и для корпуса, изготовленного из композитов. Подставив в уравнение общей прочности выражение (14), получаем

$$\eta_k (B + H) t_{cpKM} H \sigma_{0KM} = \eta_k (B + H) t_{cpLC} H \sigma_{0LC}, \quad (15)$$

где  $t_{cpKM}$ ,  $t_{cpLC}$  – средняя толщина обшивки корпуса соответственно из композита и из легкого сплава;  $\sigma_{0KM}$ ,  $\sigma_{0LC}$  – пределы прочности, соответственно, композита и легкого сплава.

Выражение (15) является условием равной прочности конструкций корпуса, изготовленного из легких сплавов и конструкций корпуса, изготовленного из композитов. Для корпусов, имеющих единые размеры, это условие будет иметь вид

$$\frac{t_{cpLC}}{t_{cpKM}} = \frac{\sigma_{0KM}}{\sigma_{0LC}}. \quad (16)$$

Выражение (16) позволяет определить предел прочности композита и его среднюю толщину при условии совместной деформации при общем изгибе корпуса, состоящего из нижней части (собственно корпуса АСВП), изготовленной из легких сплавов, и верхней части (надстройки АСВП), изготовленной из композита.

Создание конструкции из композита представляет собой решение триединой задачи. Это выбор армирующих и связующих материалов для композита (стеклопластик, углепластик), разработка его конструкции (схем армирования, послойной структуры, определение мест расположения подкрепляющих и усиливающих элементов конструкции, закладных деталей и др.), а также технологии его изготовления (контактное формование, вакуумная инфузия и проч.) На этапе разработки проекта надстройки АСВП решаются все эти вопросы.

В дополнение к нагрузкам от общего изгиба корпуса АСВП, на поверхность его нижней части, изготовленной из легких сплавов, действует комплекс локальных статических и динамических нагрузок. Поверхность надстройки из композитов подвергается эпизодическим внешним воздействиям локальных нагрузок, имеющих существенно меньшую величину и принципиально иной характер. Конструкции корпуса и надстройки АСВП обеспечивают прочность при действии этих различающихся нагрузок, поэтому имеют различную площадь поперечного сечения и соответственно различную массу единицы поверхности.

Рассмотрим элемент поперечного сечения корпуса и надстройки длиной  $\Delta L$  (рис. 1) Выделим на поверхности нижней части корпуса элементарную дугу  $S_{ki}$ , а на поверхности надстройки  $S_{nj}$ . Отнесем к площадке  $S_{ki} \Delta L$  массу всех конструкций  $G_i$ , находящихся на этой площадке. Соответственно к площадке  $S_{nj} \Delta L$  будет отнесена масса всех конструкций  $G_j$ , находящихся на этой площадке. Тогда масса первого участка может быть представлена как

$$P_1 = \sum \sum G_i S_{ki} \Delta L. \quad (17)$$

Масса второго участка может быть определена как

$$P_2 = \sum \sum G_j S_{nj} \Delta L. \quad (18)$$

Определим моменты относительно плоскости мидель - шпангоута и основной плоскости для каждого элементарного участка. Соответственно, для нижней части (собственно, корпуса) и верхней части (надстройки) корпуса АСВП запишем:

$$M_{1x} = \sum \sum G_i S_{ki} X_i \Delta L, \quad (19)$$

$$M_{1z} = \sum \sum G_i S_{ki} Z_i \Delta L, \quad (20)$$

$$M_{2x} = \sum \sum G_j S_{nj} X_j \Delta L, \quad (21)$$

$$M_{2z} = \sum \sum G_j S_{nj} Z_j \Delta L. \quad (22)$$

Масса всего корпуса АСВП равна:

$$P_1 + P_2 = \sum \sum G_i S_{ki} \Delta L + \sum \sum G_j S_{nj} \Delta L \quad (23)$$

Координаты его центра тяжести определяются, как:

$$X_{gk} = \frac{(M_{1x} + M_{2x})}{P_k} = \frac{(\sum \sum G_i S_{ki} X_i \Delta L) + (\sum \sum G_j S_{nj} X_j \Delta L)}{\sum \sum G_i S_{ki} \Delta L + \sum \sum G_j S_{nj} \Delta L} \quad (24)$$

$$Z_{gk} = \frac{(M_{1z} + M_{2z})}{P_k} = \frac{(\sum \sum G_i S_{ki} Z_i \Delta L) + (\sum \sum G_j S_{nj} Z_j \Delta L)}{\sum \sum G_i S_{ki} \Delta L + \sum \sum G_j S_{nj} \Delta L} \quad (25)$$

Используя выражения (20)–(25), варьируя толщину и другие характеристики материалов корпуса и надстройки АСВП, можно оптимизировать массу корпуса и надстройки судна, обеспечивая положение центра тяжести судна в соответствии с условиями, определенными из уравнения ходкости и необходимого дифферента. Изменение весовых и механических характеристик материалов корпуса и надстройки АСВП позволяет, в определенных пределах, управлять положением центра тяжести по высоте, что дает возможность влиять на характеристики остойчивости судна.

Оценим эффект от применения в конструкции АСВП композитов. Представим полную массу судна в виде

$$D = \sum P_i = q_k(LBH) + p_m N + p_T N t + \sum P_{i-3}, \quad (26)$$

где  $p_m$  – измеритель по статье «Механизмы»;  $p_T$  – измеритель по статье «Топливо»;  $t$  – продолжительность рейса;  $\sum P_{i-3}$  – масса по статьям нагрузки без статей «Корпус», «Механизмы», «Топливо».

Если неизвестен измеритель  $p_T$ , запас топлива может быть рассчитан также по предполагаемой дальности действия АСВП. В этом случае определяется продолжительность предполагаемого рейса по заданному радиусу действия:

$$t = \frac{2l}{kv}, \quad (27)$$

где  $t$  – продолжительность окружного рейса, ч;  $l$  – дальность действия АСВП, км;  $k_2$  – коэффициент, учитывающий снижение линейной скорости за счет непрямолинейной траектории движения, препятствий и других подобных факторов  $1 > k = 0,7-0,8$ ;

$$P_{\text{топл}} = q_m n N t = \frac{2q_m N l}{k_2 v}, \quad (28)$$

где  $q_m$  – удельный расход топлива главных двигателей на полной мощности.

Для АСВП мощность главных двигателей может быть представлена как

$$N = a D v \quad (29)$$

где  $a$  – коэффициент пропорциональности, определяемый при анализе базы данных.

Подставив выражение (29) в (26) получаем:

$$D = q_k(LBH) + a p_m D v + a D v p_T + \sum P_{i-3} \quad (30)$$

Снижение массы корпуса за счет применения композитов представим как  $\Delta P_k$ . Снижение массы корпуса позволяет дополнительно снизить массу главных двигателей за счет снижения потребной мощности, достаточной для поддержания заданной скорости. Кроме того, дополнительно может быть уменьшен запас топлива за счет снижения расходных характеристик двигателей. Образовавшаяся экономия полной массы  $\Delta D$  может быть направлена на увеличение полезной нагрузки судна (например, увеличение количества пассажиров или прием, в дополнение к имеющимся пассажирам, генерального груза), которое может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} \Delta D &= \Delta D W = \Delta P_k + a p_m \Delta P_k v + a p_T \Delta P_k v t = \\ &= \Delta P_k (1 + a p_m v + a p_T v t). \end{aligned} \quad (31)$$

Возвращаясь к интегрированным расходным характеристикам АСВП (1)–(3), можно увидеть, что за счет увеличения полезной нагрузки происходит улучшение экономических показателей эксплуатации АСВП. Кроме того, в качестве варианта повышения потребительских качеств АСВП, образовавшаяся экономия полной массы частично может быть направлена на повышение запаса топлива и соответственно увеличение дальности действия судна. Сохранение первоначальной мощности главных двигателей при снижении массы корпуса влечет за собой увеличение энерговооруженности АСВП, что, как правило, способствует повышению его амфибийных качеств.

#### Библиографический список

1. **Андреев, Г.Е.** По воде и по суше (Очерки о разработке и применении судов-амфибий) / Г.Е. Андреев [и др.]. – М. ИНИЦ Роспатента, 2002. – 272 с.
2. **Францев, М.Э.** Анализ эксплуатационных и экономических аспектов в модели проектной оптимизации амфибийных катеров на воздушной подушке, предназначенных для перевозки пассажиров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева; НГТУ. Нижний Новгород, 2012. №2. С. 179–184.

*Дата поступления  
в редакцию 22.01.2015*

**M. E. Frantsev**

#### **PROJECT JUSTIFICATION TO INCREASE THE USEFUL LOAD OF AMPHIBIOUS HOVERCRAFT USING COMPOSITE MATERIALS IN ITS DESIGN**

«Neptun-Sudomontaj», Moscow

**Subject:** The article outlines the principles for increasing payload amphibious hovercraft, which can be implemented at the design stage, using elements of composite materials. Engineering equation given in the first equation and the equation of the load resistance.

**Approach:** When the basic decisions in the project amphibious hovercraft are justified, it is advisable to analyze their integrated metering characteristics, including the full weight of the ship, its speed, main engine power, specific fuel consumption, and the characteristics of the load on the vessel - dwt and its components.

**Conclusions:** After analyzing the main components of the load mass, you can see that the main reserve increase in payload amphibious hovercraft is the correct design of its body, which consists in the optimal combination weight of the body, the General and local strength. Economic performance amphibious hovercraft may be improved by increasing its useful load.

*Key words:* amphibious hovercrafts, payload, composites.